

小型・高品質電子ビーム発生装置マイクロトロン

長谷川大祐、山田廣成

(株)光子発生技術研究所 (<http://www.photon-production.co.jp/>)

1. はじめに

(株)光子発生技術研究所は「みらくる」という名の卓上型放射光発生装置を製造・販売する会社です。「みらくる」は赤外線、軟X線、硬X線といった様々な光を発生する低エネルギー電子を用いた完全円形で世界最小の電子蓄積リングです。蓄積リング内の電子軌道中に極微小ターゲットを置き、高輝度のX線を発生します。ターゲットのサイズでX線の焦点サイズが決まるため、高エネルギーX線を用いて極めて精細なX線画像を撮ることができます。原子力発電所や工場のプラント施設の配管を数 μm という高精度でX線非破壊検査することが可能です。

この「みらくる」の入射加速器に用いている電子線加速器がマイクロトロンです。弊社のマイクロトロンは小型かつ高性能な電子線加速器です。マイクロトロン型の加速器は、図1に示すように、電子銃で発生した電子を一様な磁場中で周回させながら、加速空洞を通過する毎に一定エネルギーを追加して行く加速装置です。加速された電子は、所定のエネルギーに達すると、磁気遮蔽された取出し管から装置外部へ取り出されます。

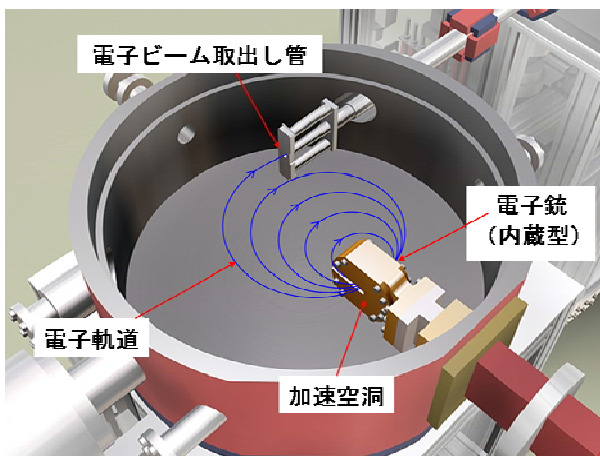


図1 電子銃内蔵型マイクロトロンの概略イメージ。電子は一様な磁場中で周回し、加速空洞で加速され、所定のエネルギーに到達すると取出し管から出力される。

弊社が開発した最大エネルギー20MeVのマイクロトロンは発生電流値が最大 150mA であり、400Hz の繰り返し運転を長時間行っても問題がありません。電子蓄積リングの入射器としては幅 $1\mu\text{s}$ のパルスビームを発生します。またエネルギー分散が 1%以下と低いのが特長です。2MeV のマイクロトロンならば、500mA の発生が可能です。大きさは、10MeV ならば、外径 60cm と小型です。

このマイクロトロンの特長を活かし、滅菌・殺菌用に平均出力 50 kW、電子エネルギー10 MeV、パルス幅 $5\mu\text{s}$ 、繰り返し 10kHz の電子線照射装置を提供します。冷却能力を上げる必要が有りますが、加速空洞のQ値が非常に大きいことと、加速効率が高いことにより、それほど大きな熱の発生は無いと考えられます。本稿では、弊社マイクロトロンの加速原理とその特長、他の電子線照射装置との比較を述べます。

2. マイクロトロン

弊社のマイクロトロンのラインナップは1~20 MeV です。エネルギー分散が 1%以下で最大ビーム電流が 100 mA 以上と高輝度です。エネルギー分散が低いために、集束磁石により $100\mu\text{m}$ 程度の焦点サイズが容易に達成できます。さらに 20 MeV、100 mA の装置であっても装置外径が 1.3 m と従来の装置に比べ小型です。6~10 MeV タイプでは磁石外径が僅か 65 cm、1 MeV タイプでは 25 cm 四方です。従来のマイクロトロンをご存知の方には、100 mA 以上のビームを出すのは不可能だと思われるかも知れませんが、次のような従来のマイクロトロンには無かった特長を持っているためにそれが可能となりました。

2. 1 電子銃内蔵型マイクロトロンの特長

弊社のマイクロトロンは Kapitza 型と呼ばれるもので、電子を加速する加速空洞に電子銃を内

蔵しているのが特長です。いわゆる RF 電子銃となっており、電子銃から引き出されるビームのエミッタンスとエネルギー分散を低く抑えることができます。加速空洞で発生する 1MV という高い加速電圧で、電子を一挙に引き出すために、非常にエミッタンスの低い電子ビームが生成されず。LaB₆ を 2000 度に加熱して引き出すエミッション電流値は、1A 以上を容易に達成できます。磁場がかかっている加速空洞内で折り返して出てくる 1MeV 電子の電流値は、500mA です。その後電子は、周期的に加速空洞を通過し、4MeV では 150mA まで減衰しますが、それ以上の減衰はありません。20MeV でも 150mA を取り出すことができます。この結果、ビームのエネルギー分散は 1% 以下で、加速効率は 35 % を達成します。

磁場中を周回しながら電子を加速するため、磁場の調整で加速位相の同期を容易にとることが出来ます。言い換えれば、弊社マイクロトロンはライナックにおけるプリバンチャ・加速管・α電磁石をひとまとめにしたようなハイブリッドな加速器といえます。極めてシンプルな構造で、電子エネルギーの選別を行い、選別された電子のみを加速します。従来のマイクロトロンでは、空洞の外部にある電子銃で電子を発生して加速する方法が取られていました。入射の共鳴条件を作るために、磁場を強くすることが出来ませんでした。そのため従来の 20 MeV のマイクロトロンでは装置直径が 3 m 近くあり、ビーム電流も 10mA 程度でした。それに比べて Kapitza 型マイクロトロンでは電子銃を空洞に内蔵しているため、装置の小型化とビームの高輝度化が達成されます。さらに、従来の Kapitza 型が 80mA 程度の電流値を発生していたのに対して、独自の工夫を凝らしたことにより、120~150mA まで向上させることができました。弊社のマイクロトロンは、高エネルギーリニアックの前段加速器としても有意義です。

2. 2 マイクロトロンの動作原理

マイクロトロンは、時間的に一定で一様な磁場 B_0 中で電子が周回しながら、一定周波数 f_0 の高周

波加速空洞で加速する装置です。図 1 に示したように、周回する各軌道は加速空洞の位置で接する円軌道になります。電子の周回運動と加速高周波が同期するためには、 n ターン目の周回運動の周期 T_n が高周波の周期 T_{rf} の整数倍である必要があります。 n ターン目での質量を m_n とすると、周期 T_n は、

$$T_n = 2\pi m_n / eB_0$$

となり、上記の条件 $T_n = nT_{rf}$ から、

$$nT_{rf} = 2\pi m_n / eB_0$$

となります。加速空洞で 1 回あたりに加速されるエネルギーを ΔE とすると、このときの電子の質量変化は $\Delta m = \Delta E / c^2$ なので、

$$m_n = n\Delta m$$

となり、

$$T_{rf} = 2\pi \Delta m / eB_0$$

の関係が得られます。

実際に弊社のマイクロトロンでは、図 1 のような単一の加速空洞を用いるので、1 回に加速できるエネルギーは電子の静止エネルギー 0.511 MeV またはその 2 倍の 1 MeV にしています。RF 電場で引き出すことの出来る最大電流値は、Child-Langmuir の空間電荷制限電流式

$$j_{sc} = 2.33 \times 10^{-6} (V^{3/2} / d_2)$$

で決まりますので、電流密度 30 A/cm² のビームを引き出すためには 500 kV 以上の電圧が必要となります。従って、我々のマイクロトロンでは、電子銃の集束力と十分な引き出し電流を得るために、加速電圧を 1 MeV に選んでいます。これが電子銃内蔵型マイクロトロンで低エミッタンスの大電流電子ビームを発生できる理由です。従来の静電型電子銃では、電子の引き出しに、500 kV 以上の負の高電圧をかけますので、電子銃を高圧で浮かせなければならないというやっかいな問題もあります。電子銃を加速空洞に内蔵しているマイクロトロンではその必要がありません。我々のマイクロトロンが軽量小型であるもう一つの理由がここにあります。負の高電圧が必要ありませんから、実に使い勝手の良い、メンテがし

やすい装置になっています。

2. 3 加速位相の安定性

電子銃を出た後、電子は磁場中を周回しながら加速空洞を通過する毎に

$$\Delta E = eV \sin \phi$$

で加速されます。ここで ϕ は高周波電圧の位相です。各ターンの中心軌道に沿って加速する同期位相を ϕ_s とすると、同期位相にあるときのエネルギー増加率は

$$\Delta E_s = eV \sin \phi_s$$

となります。上式で周回する電子が加速空洞を通過すると、次に空洞を通過する位相は ϕ_s になり、加速と同期します。一方、同期位相より進んでいる ($\phi < \phi_s$) 電子の運動を考えると、空洞を通過するとき受けるエネルギー ΔE は同期する電子が受け取る ΔE_s より大きいので、同期する電子のエネルギー E_s より大きくなります (図 2 (a)参照)。磁場が時間的に一定で一様なので、エネルギーの高い電子は大きな半径の軌道をとるので、次に空洞へ到達するときには位相が ϕ_s に近づきます。位相が ϕ_s を越えると $\Delta E < \Delta E_s$ となりますが、エネルギーが $E < E_s$ となると再び位相 ϕ が進みはじめます。図 2 (b)に示すような位相とエネルギーの関係性を $\phi - E$ 平面に描くと、同期条件から外れた電

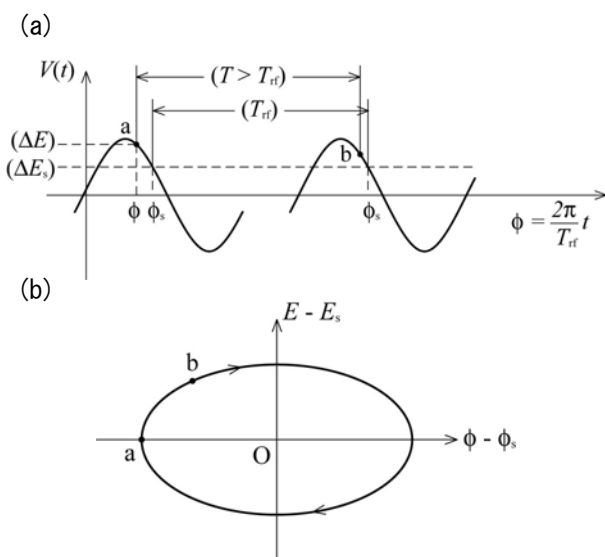


図 2 (a) 位相安定性の原理と (b) $\phi - E$ 平面での軌跡。

子は位相 ϕ とエネルギー E が ϕ_s と E_s のまわりを振動することになります。すなわち、同期位相から外れた電子も同期電子のエネルギーからあまりかけ離れることなく安定に加速されることとなります。そのためマイクロトロンは、ライナックに比べて低エネルギー分散でありながら加速効率が高くなるのです。

さらには、加速空洞がライナックと異なり 1 セルですから、高い Q 値を有する加速空洞の製作が容易だということも重要です。空洞を作るのに特殊技能を必要としません。共振周波数の調整も至って簡単です。マイクロトロンは、大量生産に向けた装置であると言えます。

3. マイクロトロン型電子線照射装置

この様に弊社のマイクロトロンは小型で高性能な電子線加速器ですから、10 MeV で 50 kW の電流を発生することにさして問題はありません。単に加速空洞の冷却効率を上げるだけだと考えて下さい。ライナックからの類推でマイクロトロンを評価するのは危険です。また、電子線照射装置として 50kW は不十分だと考える方がいるかも知れません。ところが、装置が小型であるために、図 3 に示すように、必要に応じていくらかでもマイクロトロンを追加するという解が生まれます。複数台をタンデムに並べて電子線照射サービスを行えば、照射荷物の増減に応じて、稼働するマイクロトロンの数を変えて、経費の削減が出来ます。あるいは、照射サービスを休むことなく、一台ずつメンテを行うことが可能となりますから、大変効率の良い経営ができると考えられます。

現在利用されている滅菌・殺菌用の電子線照射装置にはロードトロン、静電型、あるいはライナックがあります。ロードトロンはビーム出力が最大 200 kW あり大出力ですが、装置本体部の外径が 3 m と大きいので照射施設も大きな物となります。一方、我々のマイクロトロンは 1/5 程の 65 cm と小型なので、既存施設の更新を行うのに建家の増改築は不要です。静電型電子線照射装置は電子

エネルギーの上限が 5 MeV であることと、装置本体が大きくなります。高圧部に電子銃があるため、電子銃や加速管のメンテナンスは面倒な作業となります。弊社のマイクロトロンでは電子銃の交換が極めて容易です。カセットを取り替えるだけの方式になります。ライナックは、構成がシンプルなために、従来から産業や医療の分野で広く用いられてきましたが、電子を直線的に加速し、エネルギーの選別をしませんので低エネルギー電

4. おわりに

加速器に対する産業界のニーズは小型化だけでなく高品質・高性能へと移っています。弊社が提供するマイクロトロンはこのニーズに充分応えられる性能を持っていると確信します。国内のいくつかの電子線照射施設では装置が老朽化しており置き換えが必要な時期に来ていると聞きますが、弊社は国内メーカーとして高エネルギー電子線加速器を提供できる数少ない企業です。大

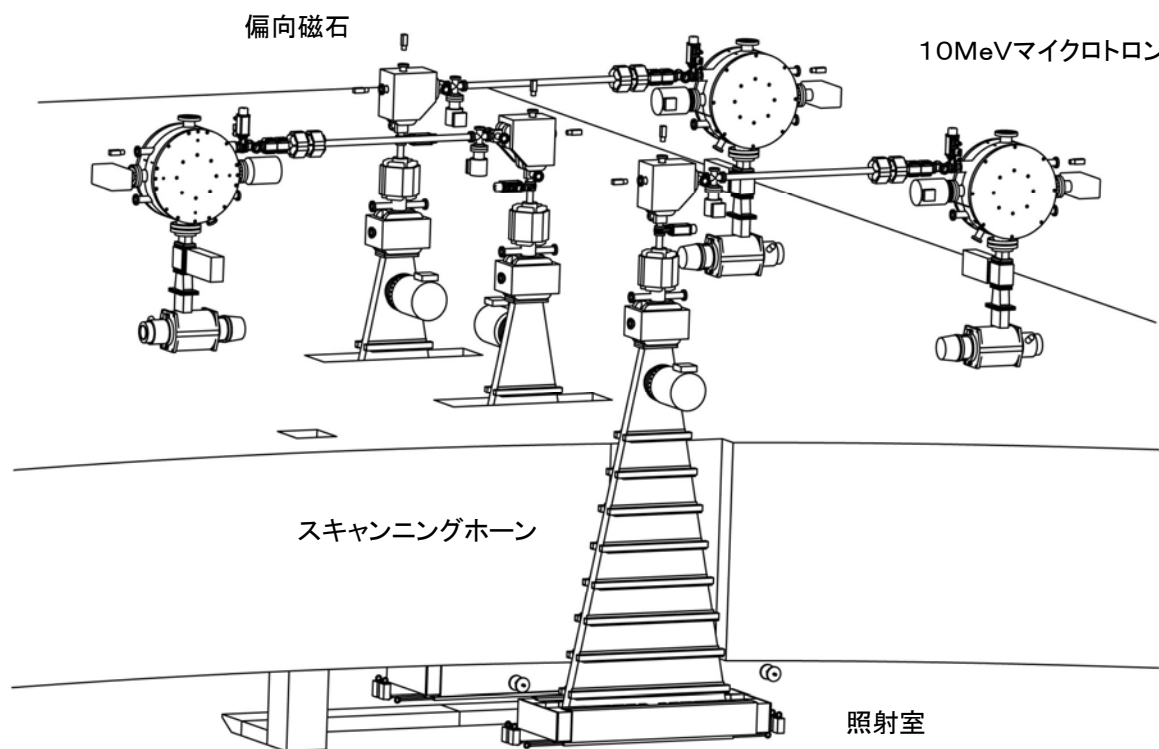


図3 マイクロトロンをタンデムに置いた電子線照射ラインのイメージ図。

子も同時に加速することとなり、加速効率は5%以下となります。またライナックが電子エネルギーと共に長くなるのに対して、円軌道で加速するマイクロトロンは高エネルギーでも小型に収める事が出来、高エネルギーほど有利になります。

以上の様に、当社のマイクロトロンは、小回りのきく大パワー装置であり、各地に分散して照射サービスセンターを開設するのに適しています。各地に分散したサービスは荷物の輸送経費を削減できることから、今後の大きなトレンドになると思われます。

手加速器メーカーが加速器事業から撤退して久しく、日本の加速器技術の衰退が懸念される中で、新しい技術で一步を踏み出した(株)光子発生技術研究所に皆様のご指導ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。

長谷川 大祐
 (株)光子発生技術研究所 主任研究員
 山田 廣成
 立命館大学理工学部・教授
 放射光生命科学研究所センター長
 (株)光子発生技術研究所・CTO